

они подогреваются до температуры не ниже 400 °С и поступают по газоходу в камеру смешения (5), куда подаются продукты сгорания внешнего топлива с температурой не ниже 800 °С из камеры горения природного газа (4). Смесь газов с продуктами сгорания поступают в камеру дожигания (6), где они находятся в течение определенного времени (не менее 1–3 с). Образующиеся газообразные продукты поступают на теплообменник для подогрева исходных газов (2). После подогрева исходных газов до температуры не выше 400 °С отводимые по газоходу (7) газовые компоненты будут иметь температуру около 700 °С и могут быть использованы на технологию или теплоэнергетические нужды.

Как показывает практика минераловатного производства, предлагаемая схема установки способна утилизировать на 95–97 % фенольные компоненты с избыточным содержанием фенола не выше 0,095–0,595 кг/ч или 2,11–1,16 мг/м³, формальдегида 0,171–0,216 кг/ч или 1,4–2,54 мг/м³.

Список использованных источников

1. Воронов Г.В. Конструирование и расчет сушильных печей и установок литейного производства: учебное пособие для вузов / Г.В. Воронов, С.Н. Гуцин, М.Д. Казяев, Ю.В. Крюченков, В.М. Миляев. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2002. – 264 с.

2. Гуцин С.Н. Топливо и расчеты его горения / С.Н. Гуцин, Л.А. Зайнулин, М.Д. Казяев, Б.П. Юрьев, Ю.Г. Ярошенко; под науч. ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2007. – 89 с.

3. Казяев М.Д. Конструирование и расчет сушильных агрегатов: учебное пособие / М.Д. Казяев, В.С. Шаврин, И.П. Ренжин, Г.В. Воронов, С.Н. Гуцин. – Свердловск: УПИ, 1989. – 80 с.

4. Советкин В.Л. Теплофизические свойства веществ: учебное пособие / В.Л. Советкин, Л.А. Федяева. – Свердловск: УПИ, 1990. – 104 с.

УДК 621.1.016

Е. С. Селезнев, П. Ю. Худяков, П. С. Филиппов

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ТЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОБСТВЕННОЙ БИБЛИОТЕКИ СВОЙСТВ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА WATER-STEAM CALCULATOR

Аннотация

В работе рассмотрен процесс моделирования и автоматизированного расчета тепловых схем ТЭС в программной среде MATLAB с внедрением и использованием созданной компьютерной динамически подключаемой библиотеки DLL параметров воды и водяного пара на основе действующей формуляции IAPWS-IF97. В рамках работы были смоделированы блоки

теплоэнергетического оборудования и установок с дальнейшей возможностью внесения корректировок в схему. Был произведен расчет тепловой схемы ТЭС с турбоагрегатом Т-110/120–130. На основе созданной модели была рассчитана проточная часть турбины со всеми необходимыми параметрами отборов пара на следующие элементы схемы: подогреватели высокого и низкого давлений, сетевые подогреватели, деаэратор. Произведена оценка предварительного расхода пара на турбину. Оценена временная эффективность данного метода автоматизированного расчета и моделирования.

Ключевые слова: IAPWS-IF97; свойства воды и водяного пара; тепловые схемы, моделирование; автоматизированный расчет; теплоэнергетическое оборудование; элементы тепловой схемы.

Abstract

The paper discusses the process of modeling and automated calculation of thermal circuits HPP in the MATLAB software environment with the implementation and use of the computer-generated dynamically-connected DLL library of water and steam parameters based on the active IAPWS-IF97 formulation. Within the framework of the work, blocks of heat-power equipment and plants were simulated with the further possibility of making adjustments to the scheme. The thermal scheme of the TPP with the turbo-generator T-110/120-130 was calculated. On the basis of the created model, the flow part of the turbine with all the necessary parameters of steam sampling for the following circuit elements was calculated: high and low pressure heaters, network heaters, deaerator. The preliminary steam consumption for the turbine is estimated. The time efficiency of this method of automated calculation and modeling is estimated.

Key words: IAPWS-IF97; properties of water and water vapor; thermal schemes, modeling; automated calculation; heat power equipment; elements of the thermal scheme.

В настоящее время актуальной является задача автоматизации расчета тепловых схем ТЭС с целью оптимизации параметров процесса. Преимущество моделирования заключается в возможности отслеживания параметров на каждом этапе. Автоматизированный расчет модели той или иной тепловой схемы в среде MATLAB-Simulink позволяет определить ее энергоэффективность, приложив к этому минимальные усилия.

Для обеспечения процесса моделирования была разработана библиотека свойств воды и водяного пара *.dll (на основе действующей формуляции IAPWS-IF97 [1]) как составляющая собственной программы [2] (была представлена на конференции [3]), которая впоследствии является подключаемым модулем и интегрируется в MATLAB. С помощью функций, заложенных в ней, в процессе моделирования удастся определить такие величины воды и водяного пара, как: энтальпия, энтропия, температура и т.п. Без автоматизированного вычисления этих параметров пришлось бы использовать либо таблицы со свойствами, либо специальные программы – а это все увеличивает время моделирования и вызывает неудобства для специалиста. Поэтому, подготовительным этапом к началу моделирования является загрузка этой библиотеки.

Исходными данными, которые задает пользователь, являются следующие параметры: электрическая мощность турбины, начальные параметры перегретого пара (давление и температура), давления в отборах турбины, давления в конденсаторе и деаэраторе, КПД каждого из элементов, количество отпускаемой теплоты и температурный график сети в расчетном режиме и т.п.

Для получения всех параметров пара для отборов сначала необходимо рассчитать проточную часть турбины (рисунок 1). Считается, что давление пара перед рабочими лопатками турбины ниже номинального на 5 %, так как пар дросселируется в стопорном клапане, а также происходит потеря давления в регулирующих органах. Зная начальные давление и температуру острого пара, находятся энтальпия и энтропия по соответствующим функциям $h(p,T)$ и $s(p,T)$ из подключенной библиотеки. Энтропия острого пара после дросселирования определяется с помощью функции $s(p,h)$ в зависимости от соответствующего давления и энтальпии. Для нахождения теплоперепада идеального (адиабатного) процесса по заданному давлению в конденсаторе и энтропии функцией $h(p,s)$ определяется энтальпия в конденсаторе. Разница между энтальпиями сдросселированного острого пара и в конденсаторе и есть располагаемый теплоперепад идеального процесса. Умножив его на относительный внутренний КПД турбины получается теплоперепад реального процесса. Энтальпия острого пара за вычетом теплоперепада реального процесса – энтальпия в конденсаторе в конце реального процесса расширения. Далее, с помощью функции $s(p,h)$ в той же точке процесса определяется энтропия [4].

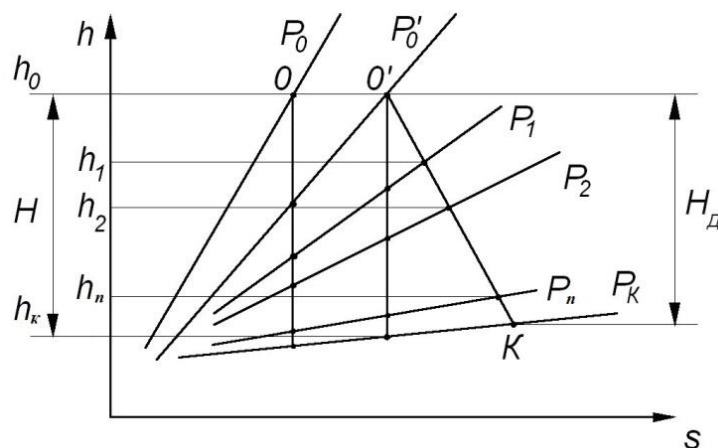


Рис. 1. Процесс расширения пара в проточной части турбины

Например, один из созданных блоков – паровая турбина. Блок программного типа SubSystem представлен далее на рисунке 2. Можно заметить, что входными величинами являются давление p_0 и температура t_0 острого пара, давления в отборах p_i и в конденсаторе p_k . Выходные величины – энтальпии (h) с соответствующими индексами. Все расчеты производятся и отображаются внутри этого блока. Подробнее эти операции можно посмотреть, нажав на него двойным кликом (для раскрытия).

Параметры пара в любом отборе определяются математически. Для этого, зная энтальпии и энтропии в точках 0 и 0' согласно рисунку 1, можно составить уравнение прямой, проходящей через данные две точки, и найти точку пересечения с прямой процесса расширения пара в турбине при соответствующем давлении отбора. В данном случае уравнение составлено для нахождения энтальпии. Чтобы найти энтропию при соответствующем давлении, можно воспользоваться функцией $s(p,h)$. Нахождение параметров пара в других отборах выполняется

аналогичным способом. Модель процесса нахождения параметров в отборе представлена на рисунке 3.

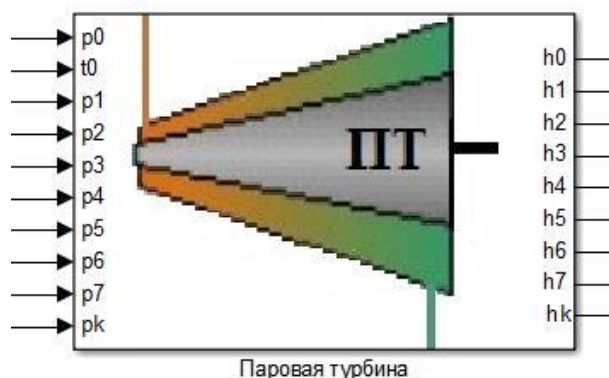


Рис. 2. Блок расчета параметров паровой турбины

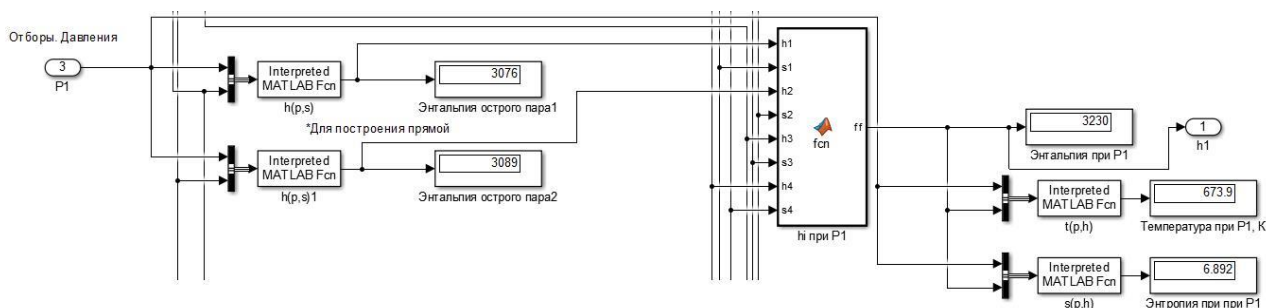


Рис. 3. Процесс нахождения параметров пара в отборе

После этого необходимо определить предварительный расход пара на турбину. Через коэффициенты недовыработки электроэнергии по всем отборам, зная мощность, КПД, коэффициент регенерации β , начальную и конечную энтальпии процесса расширения и расходы на сетевые подогреватели, можно определить общий расход пара на турбину. На этом же этапе определяются расходы на различные элементы и расход питательной воды ($G_{пв}$).

При моделировании подогревателей низкого давления (ПНД) давление в каждом подогревателе принимается на 8 % меньше, чем давление пара соответствующего отбора. По этому давлению с помощью функции $h1_ps(p)$ (энтальпия воды на линии насыщения) можно найти энтальпию конденсата греющего пара. Энтальпия дренажа пара составляет 94 % от предыдущей, а энтальпия воды на выходе из ПНД принимается меньше на 21 кДж/кг соответственно. Энтальпия воды на входе является входной величиной либо после предыдущего подогревателя, либо после конденсатного насоса. Использованный теплоперепад потока пара – разница между энтальпией острого пара и энтальпией пара соответствующего отбора. Для определения расхода пара на подогреватель составлена функция и необходимо задать КПД. Расход пара на подогреватель определяется по следующей формуле:

$$D_i = \frac{G_{ок} \cdot (i_{ок}^{ex} - i_{ок}^x) \cdot \frac{1}{\eta} - D_{dp}^{ex} \cdot (i_{dp}^{ex} - i_{dp})}{i_{отб} - i_{dp}}, \quad (1)$$

где $G_{ок}$ – расход основного конденсата, кг/с; $i_{ок}^{вх}$ и $i_{ок}^{вых}$ – энтальпии основного конденсата на входе и выходе подогревателя соответственно, кДж/кг; η – КПД подогревателя; $i_{др}^{вх}$ и $i_{др}$ – энтальпия поступающего дренажа и дренажа пара после подогревателя соответственно, кДж/кг; $D_{др}^{вх}$ – расход поступающего дренажа, кг/с; $i_{отб}$ – энтальпия пара соответствующего отбора.

После, сложив полученный расход пара на подогреватель с предыдущим расходом дренажа, можно использовать полученное значение далее при необходимости.

Если между подогревателями происходит добавление постороннего дренажа, например из сетевого подогревателя, необходимо вычислить его расход и энтальпию после смешения с основным конденсатом. Уравнение для определения энтальпии после смешения выглядит следующим образом:

$$i_{ок} = \frac{D_i \cdot i_{ок}^{вх} + D_{сн} \cdot i_{сн}}{G_{ок}}, \quad (2)$$

где $D_{сн}$ и $i_{сн}$ – расход (кг/с) и энтальпия дренажа пара (кДж/кг) после сетевого подогревателя соответственно. Остальные принятые обозначения совпадают с формулой (1).

Общий расход основного конденсата на последующий элемент тепловой схемы определяется вычитанием из расхода основного конденсата $G_{ок}$ различных внедренных потоков согласно смоделированной схемы.

Расчет подогревателей высокого давления (ПВД) выполняется аналогичным способом, за исключением того, что энтальпия воды на выходе из него принимается на 8.4 кДж/кг меньше, чем энтальпия конденсата греющего пара. Уравнение для определения расхода пара на подогреватель совпадает с уравнением (1), но разница в том, что после деаэратора основной конденсат преобразуется в питательную воду.

Сетевая подогревательная установка, в том числе два сетевых подогревателя, также присутствуют в моделируемой схеме. Зная температурный график сети (температуры $\tau_{пр}$ и $\tau_{обр}$), количество отпускаемой теплоты Q_{τ} (МВт) и теплоемкость воды $c_{в}$, можно определить расход сетевой воды $G_{св}$. Уравнение для него выглядит так:

$$G_{св} = \frac{Q_{\tau} \cdot 10^3}{c_{в} \cdot (\tau_{пр} - \tau_{обр})}. \quad (3)$$

Недогрев в каждом сетевом подогревателе (СП) составляет 5°C (принятая величина). Уравнение для определения расхода пара на подогреватель представлено ниже:

$$D_{СП} = \frac{G_{св} \cdot c_{в} \cdot (t_{св}^{вых} - t_{св}^{вх})}{\eta \cdot (i_{отб} - i_{др})}, \quad (4)$$

где $t_{св}^{вх}$ и $t_{св}^{вых}$ – температуры сетевой воды (°C) на входе и выходе в СП соответственно. Остальные обозначения рассмотрены ранее.

Расчет деаэратора заключается в составлении уравнения теплового баланса для него:

$$G_{пв} \cdot i_{пв} = \sum_1^n (D_n \cdot i_n) \cdot \eta, \quad (5)$$

где $G_{пв}$ и $i_{пв}$ – расход и энтальпия питательной воды соответственно, n – количество входных потоков в деаэратор, η – КПД деаэратора. Энтальпия воды на выходе принимается на 41,9 кДж/кг ниже, чем энтальпия насыщения при соответствующем давлении деаэратора. После учета всех потоков определяется расход основного конденсата и расход пара на редуционно-охладительную установку (РОУ).

После определения всех расходов пара из турбины определяется оставшийся расход на конденсатор [4].

Можно сделать вывод, что моделирование тепловых схем с набором имеющихся блоков для различных элементов схемы значительно ускоряет расчет, так как можно поэтапно отследить значение параметров, и освобождает пользователя от множества рутинных операций.

Список использованных источников

1. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 // The International Association for the Properties of Water and Steam. URL: <http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.pdf> (дата обращения: 15.03.2018).
2. Water-Steam Calculator: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / П.Ю. Худяков, А.Ю. Кисельников, Е.С. Селезнев. — №2018613649; дата регистрации 21.03.2018 г.
3. Селезнев Е.С., Худяков П.Ю. Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. // Разработка алгоритма расчета свойств воды и водяного пара по системе уравнений IAPWS-IF97 для моделирования тепловых схем ТЭС. Екатеринбург. 2017. С. 352–355.
4. Берг Б.В. Проектирование тепловых электрических станций: учебно-методическое пособие. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2007.

УДК 621.311.23/.26

Н. А. Семенов, В. А. Микула

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

К ВОПРОСУ ОБ УТИЛИЗАЦИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ОТХОДОВ

Аннотация

Проведен поиск оптимальных вариантов регулирования производительности котлоутилизаторов металлургической, химической, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности за счет использования отходящих газов технологических агрегатов. Рассмотрены имеющиеся схемные и конструктивные решения такие как: регулирование подачи